



GROEN LICHT VOOR DUURZAME ENERGIE

door prof dr T.J. Schaafsma



Rede bij gelegenheid van de 77e Dies Natalis
van de Landbouwwuniversiteit Wageningen
uitgesproken op 9 maart 1995.

GROEN LICHT VOOR DUURZAME ENERGIE

Mijnheer de rector magnificus, dames en heren,

De 77^e Dies Natalis van de Landbouwniversiteit is een goede gelegenheid om enige aandacht te schenken aan de toepassing van het principe van duurzaamheid op het gebruik en de produktie van energie. Het wetenschappelijk denken over dat principe kreeg een nieuwe stimulans door het Brundtlandrapport (1989) "Our common future", dat van dat principe de volgende definitie gaf:

"Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs".

Duurzame ontwikkeling geeft wat betreft de zorg voor het milieu en het verstandig omgaan met onze natuurlijke hulpbronnen aan de verantwoordelijkheid voor de komende generaties en voor het mondiale niveau meer aandacht dan vroeger het geval was. Dit is het gevolg van een groeiend besef dat inzicht in de gevolgen van ons omgaan met de natuur ons daarvoor ook verantwoordelijk maakt.

Toepassing van duurzaamheid in verschillende wetenschapsgebieden staat op dit moment nog grotendeels in de steigers. Vanwege het grote belang ervan verdient het een kritische en zorgvuldige uitwerking in een toekomstperspectief voor de aankomende generatie van jonge onderzoekers die zich bezig willen houden met de studie van landbouw en milieu.

De Landbouwniversiteit was de eerste universitaire instelling in Nederland die het duurzaamheidsconcept een

centrale plaats in haar missie gaf. De nota "Strategie richting 2000. Strategisch Plan LUW" uit 1992 zegt: "De Landbouwuniversiteit wil de wetenschappelijke kennis ontwikkelen en uitdragen die de samenleving nodig heeft om op duurzame wijze te voorzien in haar behoefte aan voldoende en gezond voedsel en een goed leefmilieu voor mens, plant en dier".

Het onderwerp "energie" wordt hierin weliswaar niet genoemd, maar energie is onmisbaar voor de instandhouding van voldoende voedselproductie en een goed milieu. De eindigheid van de natuurlijke energiebronnen moet even goed als voedsel en milieu een zorg zijn met het oog op de toekomst en hen die dan leven.

Hoe staat het eigenlijk precies met ons energiegebruik en hoelang kunnen we daarmee nog doorgaan? Europa en Noord- en Midden-Amerika met samen 17 % van de wereldbevolking gebruikten in 1991 ongeveer twee keer zoveel energie als Azië en Afrika met samen bijna viermaal zoveel mensen. Deze verhouding is er sinds 1991 vast niet beter op geworden. Binnen Europa had Nederland het hoogste energieverbruik per hoofd van de bevolking, en waren we enkele jaren geleden al bijna net zo hard aan het potverteren als de gemiddelde Amerikaanse burger¹⁾.

Wat betreft de produktie van energie zijn de winbare reserves aan olie en gas²⁾ voor nog maar ongeveer 50 jaar voldoende, tenzij er nieuwe technologie voor de winning van nu nog niet winbare reserves wordt ontwikkeld. Steenkool is er nog voor minstens een paar eeuwen, maar hieraan zitten grote nadelen voor het milieu, zelfs bij

toepassing van moderne verbrandingstechnologie. En dat terwijl ook nog voor de komende decennia de energie-behoefte vooral in de niet-Westerse wereld sterk stijgt. Deze ontwikkeling vormt een ernstige bedreiging van het milieu op mondiale schaal vanwege de verwachte sterke stijging van de uitstoot van kooldioxyde. Alleen al daarom verdienen alternatieve methoden van energie-opwekking, en met name van zonne-energie, serieuze aandacht³⁾.

Indirecte energiewinning uit zonlicht d.m.v. wind, waterkracht en biomassa wordt al jaren toegepast, maar ook onderzoek op dit gebied is nog in volle gang. Een voorbeeld van het laatste is het onderzoek naar energiewinning door herbenutting van afvalstoffen en biomassa bij de vakgroep Milieutechnologie van de Landbouw-universiteit. Evenals voor een aantal andere alternatieve energiemethoden, kan deze vorm van energiewinning op zich alleen geen grote bijdrage leveren aan de totale energieproductie⁴⁾, maar is wel economisch verantwoord in combinatie met de milieubescherpende voordelen⁵⁾ van verminderde uitstoot van de broeikasgassen kooldioxyde en methaan.

Ook wordt in Nederland zonne-energie onderzocht en toegepast in de vorm van fotonvoltaïsche elektriciteits-opwekking met behulp van zonnecellen, verwarming van woonruimten en zwembaden door zonnestraling, en warm-watervoorziening. Veel van dit onderzoek ontvangt via de organisatie NOVEM overheidssteun, en wordt in Nederland gestimuleerd door de actieve Vereniging voor Zonne-energie, de Nederlandse afdeling van de International Solar Energy Society ISES.

Vandaag hoop ik U te laten zien hoe biologische en natuurkundige inzichten kunnen helpen bij het realiseren van duurzame energieproductie uit zonlicht met behulp van zonnecellen. Maar eerst wil ik aan de hand van deze inzichten een aanzet geven voor een nadere omschrijving van duurzaam gebruik van energie door het begrip "kruissnelheid" in te voeren. Aan het eind van deze rede wil ik tenslotte met U nagaan of duurzaam energiegebruik en -productie in de wereld van vandaag kans van slagen hebben, zowel gezien de heersende wereldbeschouwingen als de praktische en economische uitvoerbaarheid.

Het kruissnelheidsprincipe

Bij de omzetting van energie gaat het altijd om een energiebron en een apparaat of organisme, dat deze energie in een andere vorm omzet.

Een voorbeeld dat U allemaal kent is de omzetting van de chemische energie van benzine in mechanische voortbewegingsenergie van een rijdende auto. De hoeveelheid benzine in de tank is beperkt en de energiebron is dus eindig. Bij een duurzaam gebruik van zo'n eindige energiebron gaat het niet om de vraag: hoe kom ik zo snel mogelijk op de plaats van bestemming, maar: hoe haal ik zoveel mogelijk kilometers uit de beschikbare benzinevoorraad, desnoods met een wat lagere snelheid en benzineverbruik, maar met meer kilometers per liter. Wat ik eigenlijk wil is een combinatie van de hoogste snelheid met het hoogste benzine-rendement. Voor de gemiddelde auto ligt die combinatie in de praktijk bij ongeveer 75 % van de maximum snelheid. Voor een sterk vereenvoudigd model⁶⁾ van de automotor kan men de combinatie van de

gunstigste snelheid met het hoogste rendement ook berekenen door de uitkomst van het rendement maal de snelheid van de auto zo groot mogelijk te maken. Deze combinatie wordt bereikt als de auto een snelheid heeft van $\frac{8}{9}$ (of ca. 87 %) van zijn maximale snelheid. Het rendement ligt dan bij $\frac{2}{3}$ (of ca. 67 %). De gunstigste snelheid noem ik in het vervolg de kruissnelheid, die dus lager ligt dan de maximaal haalbare snelheid.

Soortgelijke berekeningen laten ook voor biologische systemen zien, dat zij vaak streven naar een combinatie van maximale energie-omzetting bij een maximaal rendement daarvan. Hardlopers moeten zuinig met hun energie omgaan en stemmen daarom hun energieverbruik zo goed mogelijk af op de te lopen afstand.

In het menselijk lichaam is de energie-omzetting gekoppeld aan stofstromen. Dan wordt de maximale snelheid niet alleen bepaald door de manier van energie-omzetting, maar ook door de stofstromen. Ook bij een landbouwgewas is de energie-omzetting gekoppeld aan de kringloop van verschillende elementen, zoals waterstof, zuurstof, koolstof, stikstof en fosfor. Welke van deze elementen de omzettingssnelheid en daarmee de maximale gewasproduktiviteit beperkt, hangt af van de beschikbaarheid van voedingsstoffen, water en energie ter plaatse van de energie-omzetting. Ligt voor een ingewikkeld systeem als een landbouwgewas net als bij een auto het hoogste energierendement ook bij een lagere dan de maximale produktiviteit? Pimentel⁷⁾ vond, dat het energie-rendement (de toegevoegde waarde, d.w.z. zonder de bijdrage van menselijke arbeid) van de maïsproduktie in de V.S.

bestraling met gesimuleerd zonlicht is dit een stuk lager, nl. 6-8 %, maar nog altijd indrukwekkend.

De werking van de Grätzel-cel lijkt veel op wat in een plantebblad gebeurt. In de cel wordt zonlicht vrijwel volledig geabsorbeerd door de uiterst dunne kleurstoflaag, omdat deze op een zeer groot effectief oppervlak van fijnverdeeld titanium dioxide is aangebracht, net als in de antenne van chlorofyl moleculen bij de plant. Behalve als antenne, fungeert de kleurstoflaag tegelijk als het reactiecentrum bij de plant. In de Grätzel-cel staat de kleurstof na lichtabsorptie namelijk een elektron af aan het titaniumdioxide, waarop het is geadsorbeerd en ontstaat er een elektrische stroom.

Hoewel de Grätzel-cel werkt, heeft deze ook enkele duidelijke nadelen: het hoge rendement geldt alleen voor diffuus, indirect zonlicht en is voor direct licht behoorlijk wat lager. Verder bevat de cel een kleine hoeveelheid vloeistof en dat is niet aantrekkelijk, vanwege het gevaar van lekkage. Toch heeft het werk van Grätzel een flinke stimulans gegeven aan het wetenschappelijk onderzoek van organische zonnecellen.

In 1989 begonnen ook vanuit de Landbouwwuniversiteit de eerste voorzichtige pogingen om ook in Nederland het onderzoek aan organische zonnecellen van de grond te krijgen, en sinds 1992 loopt er op dit gebied een landelijk onderzoekprogramma, waaraan naast de Wageningse vakgroepen Moleculaire Fysica en Organische Chemie ook laboratoria van de universiteiten van Utrecht en Delft deelnemen met inbreng van hun kennis van oppervlakken en anorganische materialen. Het door NOVEM gefinancierde project heeft sindsdien verbandingen gelegd met

verschillende onderzoeksgroepen binnen en buiten Nederland, waaronder natuurlijk ook met de groep van Grätzel in Lausanne.

Wat is het doel van het Nederlandse onderzoekprogramma en wat is er in de afgelopen drie jaar bereikt? Anders dan bij de Grätzel-cel gaat het Nederlandse concept uit van een cel die alleen maar vaste componenten bevat. Een tweede belangrijk verschil is dat er geen groot oppervlak van fijn verdeeld dragermateriaal wordt gebruikt, maar een vlakke drager, waarop slechts enkele molecuul-lagen van één of meer kleurstoffen gecontroleerd worden aangebracht. Dit uiterst dunne kleurstoflaagje vervult bij de organische zonnecel dezelfde rol als het reactiecentrum bij de plant: zodra dit kleurstoflaagje licht absorbeert, geeft het een elektron af aan het daaronder gelegen dragermateriaal. Om alle opvallende licht te absorberen bevindt zich bovenop het eerste laagje een relatief dikke kleurstoflaag, die net als bij een plant als antenne fungeert. Om een doorgaande elektrische stroom mogelijk te maken, moet deze antennelaag bovendien elektrisch geleidend zijn.

Met behulp van dit type cel wordt systematisch uitgezocht welke factoren het rendement bepalen van de omzetting van licht in elektrische energie. Het is daarmee een fundamenteel maar doelgericht project.

Wat is er tot nu toe bereikt?

Uiterst dunne kleurstoflaagjes kunnen op geschikte dragers worden aangebracht waarvan de dikte en de oriëntatie van de kleurstofmoleculen ten opzichte van de drager kunnen worden gevarieerd. Bij belichting gedragen deze

kleurstoflaagjes zich precies zoals we hadden gehoopt: ze produceren een elektrische stroom, die echter nog heel klein is vanwege het ontbreken van een antennelaag. Bij de vakgroep Organische Chemie van de Landbouwniversiteit wordt hard gewerkt aan het maken van een moleculair gelaagde antenne en succesvolle experimenten met een organische zonnecel die met een aantal van deze antennelagen is uitgerust, hebben laten zien dat de antenne inderdaad doet wat deze moet doen: licht-energie snel doorgeven.

De mix van verschillende disciplines in het Nederlandse organische zonnecelproject vullen elkaar prachtig aan en hebben gezorgd voor een intensieve en stimulerende samenwerking tussen de drie deelnemende universiteiten.

De kansen voor duurzame energie

Ten slotte wil ik nog kort stilstaan bij de kansen en de voorzienbare gevolgen van een grootschalig gebruik van duurzame zonne-energie. Bijna driekwart van de mensen op deze aardbol woont in Azië en Afrika. Hun aandeel in het mondiale energieverbruik zal door de explosieve bevolkingsgroei in die delen van de wereld snel groeien. De plaats van een duurzame en harmonische relatie tussen mens en natuur in hun wereldbeschouwing zal van beslissende betekenis zijn voor de kansen van een duurzaam energiegebruik.

Ik wil daarom enkele grondmotieven uit de wereldgodsdiensten en stromingen de revue laten passeren, die veel met duurzaamheid te maken hebben.

In de Joodse traditie werd de Mozaïsche wetgeving beheerst door de gedachte dat de mens geen slaaf mag zijn van zijn medemens, maar ook niet van zijn arbeid of winstbejag door uitbuiting van zijn economische hulpbronnen¹³.

De Christelijke wereldbeschouwing kent een bijzondere rol aan de mens toe als beheerder of als "rentmeester" van de hem toevertrouwde natuur. Een rentmeester is aan de eigenaar verantwoording verschuldigd voor wat aan hem is toevertrouwd. Hij bezit dat niet, maar moet het als beheerder tot zijn recht laten komen¹⁴.

De motieven van beheer en vrijwillige matiging^{15,16} vindt men eveneens in de Islam. Zij vloeien voort uit het *tahwid*-concept, de erkenning, dat er één, absolute, transcendente Schepper is van het universum en al wat zich daarin bevindt. Voor het omgaan met de natuur gaan de meeste moslims uit van teksten uit de Koran, die de mens Gods *khalifa* (vicaris) noemt, die verantwoording schuldig is voor het pand (*amana*), dat hem is toevertrouwd in de schepping. De mens mag het pand voor zijn voordeel gebruiken, maar heeft geen absoluut recht op iets: het pand moet in goede staat worden gehouden en te zijner tijd aan de rechtmatige eigenaar worden teruggegeven^{17,18}.

In de Oosterse religies vindt men een belangrijk motief dat alle leven deel heeft aan kringlopen. Ieder levend wezen maakt op zijn tijd plaats voor een volgend en helpt de komst daarvan voorbereiden¹⁹. Voor de Boeddhist betekent dat ook een relativering van het leven van hier en nu, een verwerping van het krampachtig vasthouden en exploiteren van bezit en natuur, en het met grote eerbied

omgaan met de aarde en alle leven, juist omdat alles deel uitmaakt van een verheven cyclus. Roofbouw en begeerte zijn te vermijden en door dat te doen verheft de mens zich tegelijk tot een hoger peil in een volgend bestaan. Ook het Hindoeïsme gaat uit van de kringloopgedachte. De natuur heeft een waarde in zichzelf, en meer dan de natuur te gebruiken, moet de mens vrede en harmonie in de natuur brengen door zijn werk en rituelen²⁰⁾. In het Westen is de erkenning van de unieke waarde en de beschermwaardigheid van de natuur en het leven door Jacques Monod²¹⁾ gebaseerd op het onwaarschijnlijke wonder er van.

We kunnen concluderen, dat het zeker niet zo is, dat bij grote delen van de wereldbevolking op grond van hun wereldbeschouwing sterke weerstanden zijn te verwachten tegen duurzaam gebruik van energie en natuurlijke hulpbronnen. Het is eerder de vraag of de tegenwoordige vorm van het Westerse vrije-marktmechanisme zich op de lange duur wel zal verdragen met een duurzame ontwikkeling. In dat mechanisme zijn op dit moment maar weinig remmen ingebouwd, die kunnen leiden tot het behoud van produktie en consumptie op lange termijn. M.i. is er daarom grote behoefte aan een "nieuwe economie" waarin het behoud van ecologisch evenwicht en natuurwaarden een wetenschappelijk gefundeerde plaats heeft.

Behalve van de maatschappelijke acceptatie hangt de kans dat zonnecellen binnen afzienbare tijd een bijdrage kunnen leveren aan de wereld-energievoorziening er ook van af of

het rendement van zonnecellen technisch nog aanzienlijk kan worden verbeterd. Verder zal de kostprijs van elektriciteit uit zonnecellen zover moeten dalen dat deze kan concurreren met die uit fossiele brandstoffen. Er zijn al gallium-arsenide zonnecellen op de markt met een rendement van meer dan 30 % onder laboratoriumcondities, maar met een zo hoge kostprijs dat zij nog geruime tijd alleen voor speciale toepassingen geschikt zullen zijn, zoals in de ruimtevaart. Amorfe siliciumcellen zijn relatief goedkoop, hebben een lange levensduur, en een rendement van ruim 10 %. De prijs- en rendementsontwikkeling van dit type cellen maakt deze tot goede kandidaten voor toekomstig grootschalig gebruik²²⁾. Ook de organische zonnecel met een vergelijkbaar rendement is aantrekkelijk vanwege de relatief lage prijs van de grondstoffen en het eenvoudige fabricageproces. Bovendien kunnen bij dit type cel goedkope dragermaterialen worden toegepast. De technische ontwikkeling van organische zonnecellen loopt echter achter bij die van de eerdergenoemde cellen en vraagt nog veel onderzoek.

Bij alle vormen van energie-opwekking uit zonlicht moeten we bedenken, dat zonlicht een erg verdunde vorm van energie is. Aan het aardoppervlak varieert de energiestroom op een zonnige dag van een paar honderd Watt/m² in de gematigde zone tot 1000 Watt/m² in de tropen. Voor Nederland betekent dit dat voor een 100 Megawatt zonnecelcentrale met 10 % rendement ca. 10 km² oppervlak nodig is. De hoge grondprijs in Nederland en ons klimaat maken het erg onwaarschijnlijk dat in ons land ooit een dergelijke centrale economisch lonend zou

- ¹³⁾ De verplichting tot het afzien van arbeid op de sabbat in het vierde van de tien geboden (Exodus 20: 8-11) is daarvan het meest sprekende voorbeeld. Toepassing van de Mozaïsche wetgeving leidt tot een minder dan maximale opbrengst van de door de mens benutte natuurlijke hulpbronnen, tenminste op korte termijn. Het is niet zo moeilijk in te zien dat deze beperking op langere termijn positieve effecten op het ecologisch en sociaal evenwicht ten doel had. De gedachte dat de mens zichzelf, zijn medemens en zijn natuurlijke omgeving schade zou toebrengen, als hij het onderste uit de kan wil hebben, is op vele plaatsen uitgewerkt, b.v. in Leviticus 19:9 en 10, waar de Israëliet op het hart wordt gebonden: "Wanneer U de oogst binnenhaalt, moet U de randen van het veld niet helemaal afmaaïen en wat op de grond is gevallen moet U naderhand niet verzamelen. Hetzelfde geldt voor de wijnoogst; haal niet alle druiven van de planten en laat wat op de grond is gevallen, gewoon liggen. Laat het liggen voor de armen en de hongerige reizigers, want Ik ben de HERE, Uw God". In dezelfde lijn ligt het voorschrift: "Als U in de oogsttijd een schoof van het land vergeet te halen, ga dan niet terug om hem te halen. Laat hem achter voor de vreemdelingen, wezen en weduwen; ... Onthoud dat U slaven was in het land Egypte; daarom geef Ik U dit gebod (Deuteronomium 24:19 en 22). (Het zou mij overigens niet verbazen, als deze regels ook hebben bijgedragen aan het in stand houden van het ecologisch evenwicht in landbouwgebieden). Een ander voorbeeld dat natuurbeschermers zal aanspreken: "Als U een vogelnest op de grond ziet

liggen of U ziet er één in een boom en er zitten jonge vogels of eieren in waar de moeder in het nest op zit, haal dan niet de moeder én de jongen weg. Laat haar gaan en neem alleen de jongen. De HERE zal U daarvoor zegenen" (Deuteronomium 22: 6,7).

- ¹⁴⁾ Sommige varianten daarvan legden zoveel nadruk op de heersende rol van de mens als beeldrager Gods over de overige levende en niet-levende natuur, dat deze laatste voornamelijk als slaaf van de mens werd behandeld. Lynn White, en daarna Richard Means betoogden dat deze visie in feite aan de Christelijke notie van een transcendente God eigen is en dat het Westerse Christendom daarom verantwoordelijk gesteld moet worden voor de huidige ecologische crisis.
- "Christianity, in absolute contrast to ancient paganism and Asia's great religions (except, perhaps Zoroastrianism), not only established a dualism of man and nature but also insisted that it is God's will that man exploits nature for his proper ends". Citaat uit: L. White, The historical roots of our ecological crisis. Science 155, 1203-7 (1967); R. Means, Why worry about nature? Saturday Review, 2 December 1967.
- Beide auteurs menen een uitweg te vinden in de gedachte dat al het bestaande in wezen gelijk is en autonoom. Zowel dit concept als de opvatting van de natuur als een zuiver fysisch en aan de mens dienstbaar object hebben geen wortels in de oorspronkelijke Joods-Christelijke traditie van een geschapen wereld. Daarin hebben zowel de mens als St. Franciscus'

"broeder ezel" elk een unieke en onherleidbare relatie tot dezelfde Schepper.

- ¹⁵⁾ S. Waqar A. Hussaini, *Islamic Environmental Systems Engineering*, Londen, 1989, p. 11 e.v.
- ¹⁶⁾ Parvez Mansoor, "Environment and values: the Islamic perspective" in : Z. Sardar (Ed.), *The Touch of Midas: Science, Values and the Environment in Islam and the West*, University of Manchester Press, Manchester, 1984.
- ¹⁷⁾ Z. Sardar, "Towards an Islamic Theory of Environment" in: *ISLAMIC FUTURES*, The shape of ideas to come. London/New York, 1985.
- ¹⁸⁾ Ondanks de duidelijke overeenstemming met de eerdergenoemde Joodse en Christelijke uitgangspunten levert de uitwerking ervan soms verrassende verschillen op, o.a. in het gebruik van land en water. Zo mag een boer alleen een redelijke hoeveelheid water voor zijn gewassen onttrekken aan een riviertje op zijn grondgebied en moet hij de rest voor anderen aan de benedenloop overlaten. Hij is immers geen eigenaar van het water. Meer in het algemeen is het uitoefenen van een recht op gebruik, o.a. van natuurlijke hulpbronnen, alleen toegestaan om het doel te bereiken waarvoor het recht in het leven was geroepen (*halal*). Elk gebruik is illegaal wanneer dit schadelijk is voor anderen of voor het milieu (*haram*). De mens is ook verantwoordelijk voor het misbruik van de amana en

zal daarvoor een prijs moeten betalen in deze wereld en in het hiernamaals.

- 19) V. Westhoff, "Boeddhisme en omgang met de aarde" Saddharma, Tijdschrift van de Stichting Vrienden van het Boeddhisme, jrg. 12, p. 1-15, 1979.
- 20) Voor de orthodoxe Hindu zijn de aan de oude Veda geschriften ontleende rituele teksten ook de bron van wetenschappelijke kennis van de natuur, gericht op natuurbehoud. Aan de praktijk daarvan heeft Mahatma Ghandi veel gedaan (zie G.M. Speelman (red.). Om de heilheid van het bestaan. Kok, Kampen, 1989, p. 116-125).
- 21) J. Monod, Le hasard et la nécessité. Editions du Soleil, 1970.
- 22) De kostprijs van fofovoltaïsche opwekking van elektriciteit daalt met 6-8 % per jaar, zodat deze nu al in Australië lager is dan uit olie.